

Biophysical effect of climate change on summer crops

Efecto biofísico del cambio climático en el rendimiento de cultivos de verano

Adriana E. Confalone^{1,2}, C. A. Vilatte¹, Laura M. Aguas¹, Mónica S. Barufaldi¹, M. F. Eseiza¹ and Griselda D. Ponce¹

¹Núcleo de Estudios en Actividades Agropecuarias y Cambio Climático. Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Av. República de Italia 780, Azul, Buenos Aires, Argentina

²Investigador Asociado a CIC PBA (Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires) aec@faa.unicen.edu.ar

The effect of climate change on yield of soybean and maize crops was determined in Azul, Buenos Aires, Argentina. DSSAT crop models, previously calibrated, were used, under local conditions. Projections of PRECIS regional climate model in the SRESA2 stage were used, for the decades 2020-29 and 2050-59, in order to obtain potential yields. Later, the effect of heat waves during the growth cycle 2013-14 was evaluated. Climate projections indicated an increase of yields of crops during dryland farming crops. In soybean (*Glycine max* (L.) Merr.), the increase was 25 and 28 %, and in maize (*Zea mays*), it was 19 % and 26 %, for the decades 2020-29 and 2050-59, respectively. However, considering thermal variability imposed by the heat wave, it was evident that soybean and maize showed a reduction of yield when they are sown without irrigation during those extreme events. Yield decreases reach 19 % in soybean and 36 % in maize. Comparing yields of crops irrigated in a year considered as typical with respect of the year of heat wave, the increase of temperature benefits maize with a 22 % of yield increase, but harms soybean with a decrease of 13 %. Influence of temperature increase, together with water deficiencies, produces different effects on C₃ species like soybean, and in C₄ like maize. It is suggested to develop more research on the effects of extreme phenomena on different phenological phases of crops so the sustainability of agroecosystems from the center of Buenos Aires province could be maintained.

Key words: *food safety, heat wave, soybean, maize*

Introduction

In Argentina, significant changes of climate have been produced since the end of 20th century. These changes, plus economic conditions, have produced transformations in the use of land (Magrín *et al.* 2007). Reports of Intergovernmental Panel on Climate Change include a list of agrosystems with scientific evidences of the effect of these transformations in different regions of the world (MacCarthy 2001 and IPCC 2014). Nowadays, there is a concern due to the effect of extreme events on world food safety, mainly due to the high probability of increase of frequency, duration and intensity of heat waves, regarding the projections of climate change (Meehl and Tebaldi 2004).

Summer crops with the largest surface in Pampas region are soybean and maize, which are sown under dry farming conditions (without irrigation and only

Se determinó el efecto que produce el cambio climático en el rendimiento de los cultivos de soja y maíz en Azul, Buenos Aires, Argentina. Se utilizaron los modelos de cultivos del DSSAT, previamente calibrados, en las condiciones locales. Se utilizaron las proyecciones del modelo climático regional PRECIS en el escenario SRESA2, para las décadas 2020-29 y 2050-59, para obtener rendimientos potenciales. Posteriormente, se evaluó el efecto que tuvieron las olas de calor durante el ciclo de crecimiento 2013-14. Las proyecciones climáticas indican aumento en los rendimientos en cultivos de secano. En soja (*Glycine max* (L.) Merr.), el aumento es de 25 y 28 % y en maíz (*Zea mays*) de 19 % y 26 %, para las décadas 2020-29 y 2050-59, respectivamente. Sin embargo, al considerar la variabilidad térmica impuesta por la ola de calor, se evidenció que la soja y el maíz experimentaron reducción en el rendimiento cuando se cultivan sin riego durante esos eventos extremos. Las disminuciones en el rendimiento llegan a 19 % en soja y 36 % en maíz. Cuando se comparan los rendimientos de cultivos irrigados en un año considerado típico, con respecto al año en que tuvo lugar la ola de calor, se observó que el aumento de temperatura beneficia al maíz, 22% de aumento en el rendimiento, y perjudica a la soja, que rindió 13 % menos. La influencia del aumento de temperatura, unido a las deficiencias hídricas, produce efectos diferenciales en especies C₃, como la soja, y en C₄, como el maíz. Se sugiere desarrollar más investigaciones sobre los efectos de fenómenos extremos en las diferentes fases fenológicas de los cultivos, de modo que se pueda mantener la sostenibilidad de los agroecosistemas del centro de la provincia de Buenos Aires.

Palabras-clave: *seguridad alimentaria, ola de calor, soja, maíz.*

Introducción

En Argentina se han producido cambios significativos en el clima desde finales del siglo XX. Estos cambios, adicionados a las condiciones económicas, han dado lugar a modificaciones en el uso de la tierra (Magrín *et al.* 2007). Los informes del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático incluyen una lista de agroecosistemas con las evidencias científicas del efecto de estas modificaciones en distintas regiones del mundo (MacCarthy 2001 e IPCC 2014). En la actualidad, existe preocupación por el efecto que los eventos extremos puedan tener en la seguridad alimentaria mundial, principalmente por la alta probabilidad de aumento de frecuencia, duración e intensidad de las olas de calor, dadas por las proyecciones del cambio climático (Meehl y Tebaldi 2004).

Los cultivos de verano que mayor superficie ocupan en

receiving rainfall). Maize grains represent, for Argentina and for most of the countries of the world, the most used ingredient as energy supplement for feeding cattle. Soybean industry is mainly oriented towards external markets. It uses around 5 % of its production for animal feeding (SIIA 2015).

Crop growth models are a methodology for examining the effects of climate change on agriculture. In addition, it contributes to the biophysical evaluation of the effect of climate on growth, development and yield of each crop (Rosenzweig *et al.* 2013 and Chung *et al.* 2014).

The Azul region, in Buenos Aires, has a humid temperate climate with oceanic influence, type Cfb (Köppen 1931), typical of the central-eastern region of the province of Buenos Aires. Mean annual temperature is 13.9 °C. It is 21.3 °C in the warmest month and 7.4 °C in the coldest month. From the climatic point of view, when analyzing the series 1931-2006, the increase of the mean annual temperature was 0.9 °C, at a rate of 0.012 °C/year. This series showed a rupture in the thermal trends between 1967 and 1968, without the annual variability having changed, so that this increase is not due to fluctuations in climate variability but to a sustained increase in the long wave balance (Navarro *et al.*, 2011).

The design of future scenarios of climate change through regional climate models, such as MM5, PRECIS and RegCM3, projects a temperature rise of less than 2 °C for the central and southeastern region of the province of Buenos Aires between 2050 and 2060 (Marengo *et al.* 2009, Alves and Marengo 2010 and Cabré *et al.* 2010). Although the potential effects of climate change on agricultural systems for several crops have been identified in the Pampas region, using DSSAT models, the results show great spatial variability. In addition, in reports and published works, models were not locally calibrated. The estimation of potential effects of the change includes the credibility or certainty of the climatic scenarios with projections made for a period of 10 years, which prevents evaluating aspects of great importance for agricultural activity, such as interannual variability (Magrín *et al.* 2007 and Travasso *et al.* 2009).

Heat waves may be defined as long periods of extreme heat, although there is no strict definition (Robinson 2001). Even though there have been several researches that include experiments in growth chambers or in the field, in order to evaluate productivity of crops and mitigation of heat waves effect, some authors have demonstrated that the use of sowing mechanistic models is superior to other methods because it simulates biophysical responses of crops through management local practices (Chung *et al.* 2014).

These studies are new in Azul, in the center of Buenos Aires province, where it is necessary to have

la región Pampeana son la soja y el maíz, que se cultivan en condiciones de secano (sin riego y recibiendo sólo el aporte de la precipitación). El grano de maíz representa para Argentina y la mayoría de los países del mundo, el ingrediente más utilizado como suplemento energético en la alimentación del ganado bovino. El complejo industrial sojero está orientado, principalmente, hacia los mercados externos. Utiliza, aproximadamente, 5 % de su producción en la alimentación animal (SIIA 2015).

Los modelos de crecimiento de cultivos constituyen una metodología que permite examinar los efectos del cambio climático en la agricultura. Además de contribuir a la evaluación biofísica del efecto del clima en el crecimiento, desarrollo y rendimiento de cada cultivo (Rosenzweig *et al.* 2013 y Chung *et al.* 2014).

La región de Azul, en Buenos Aires, tiene un clima templado húmedo con influencia oceánica, del tipo Cfb (Köppen 1931), característico de la región centro-este de la provincia de Buenos Aires. La temperatura media anual es de 13.9 °C. Es de 21.3 °C la del mes más cálido y 7.4 °C la del más frío. Desde el punto de vista climático, al analizar la serie 1931-2006, el incremento de la temperatura media anual del partido fue de 0.9 °C, a una tasa de 0.012 °C/año. Esta serie mostró ruptura en las tendencias térmicas entre 1967-1968, sin que la variabilidad anual se hubiera modificado, por lo que ese incremento no se debe a fluctuaciones propias en la variabilidad climática, sino a un aumento sostenido en el balance de ondas largas (Navarro *et al.* 2011).

El diseño de escenarios futuros de cambio climático por medio de modelos climáticos regionales, como MM5, PRECIS y RegCM3, proyecta para la región centro y sudeste de la provincia de Buenos Aires aumento de temperatura inferior a los 2 °C hasta la década de 2050-2060 (Marengo *et al.* 2009, Alves y Marengo 2010 y Cabré *et al.* 2010). Si bien en la región pampeana se han identificado los efectos potenciales del cambio climático en los sistemas agrícolas para varios cultivos, con la utilización de los modelos del DSSAT, los resultados muestran gran variabilidad espacial. A ello se adiciona que en los informes y trabajos publicados, los modelos no se calibraron localmente. La estimación de los efectos potenciales del cambio incluye la credibilidad o certidumbre de los escenarios climáticos con proyecciones realizadas para un período de 10 años, lo que impide evaluar aspectos de gran importancia para la actividad agrícola, como lo es la variabilidad interanual (Magrín *et al.* 2007 y Travasso *et al.* 2009).

Las olas de calor suelen definirse como períodos prolongados de calor extremo, aunque al respecto no existe una definición rígida (Robinson 2001). Aunque se han realizado diversas investigaciones que incluyen experimentos en cámaras de cultivo y a campo, para evaluar la productividad de los cultivos y la mitigación de los efectos de las olas de calor, algunos autores demuestran que el uso de modelos mecanicistas de cultivos es superior a otros métodos, ya que simulan las respuestas biofísicas de los cultivos mediante prácticas

a tool for evaluating sustainability in agroecosystems under climate change conditions. Therefore, the objective of this study was to determine the effect of climate change on maize and soybean yields in Azul, in the center of Buenos Aires province, Argentina, regarding:

- Climate projections by the regional climate model PRECIS for 2030-2060
- Biophysical impact of heat waves during growth cycle of summer crops 2013/2014

Materials and Methods

Agrometeorological data. Daily agrometeorological database (solar radiation, maximum temperature, minimum temperature, precipitation, relative humidity and wind), from the central station of Centro Regional de Agrometeorología, from the Faculty of Agronomy of Azul-UNCPBA (latitude: 36°45'S; longitude: 59°57'W, altitude: 132 m o.s.l) (CRAGM 2015), was used. These data include the period from 1988 to 2015.

Sowing models. Models of soybean and maize from the package DSSAT V4.5 (Hoogenboom *et al.* 2012) were used, which allow the joining of entry and out data formats with different cropping models. Necessary data are those related to: a) climate (minimum and maximum temperature, global radiation and precipitation), constituting the standard climate file (*.WTH), with daily agrometeorological data from the Centro Regional de Agrometeorología (CRAGM 2015); b) soil (physical and chemical properties of each horizon of the profile), constituting the standard soil file (*.SOIL), with actual soil profiles (Pazos 2009 and Mestelan and Ramaglio 2011); c) management (residues, cropping times, fertilization and irrigation), included in the file (*.X). Usual sowing dates from the center of Buenos Aires province were considered in the models: November 12th and November 1st for soybean and maize, respectively. Finally, d) genetic coefficients of cultivars. All the model state variables were daily calculated and were visualized in the simulation outputs (*.OUT). In addition, this model simulates components of yield, quantifies and puts in graphs daily growth of the crop until physiological maturity and of harvest. The subroutine of crop development uses different equations, as well as values of base, optimal and maximum temperature according to the considered phenological sub-period. This generic subroutine works for different species and cultivars. Genetic characteristics of a crop are considered in the genetic coefficients or parameters, contained in three files: species (*.SPE), ecotype (*.ECO) and cultivar (*.CUL) (Hoogenboom *et al.* 2012).

Field trials. Before using these models, they were calibrated for local conditions. Therefore, cultivars of undetermined soybean from group IV

locales de manejo (Chung *et al.* 2014).

Estos estudios son incipientes en Azul, centro de la provincia de Buenos Aires, donde es necesario tener una herramienta para evaluar la sustentabilidad de los agroecosistemas en condiciones de cambio climático. Por ello, el objetivo de este trabajo es determinar el efecto del cambio climático en los rendimientos de los cultivos de soja y maíz en Azul, centro de la provincia de Buenos Aires, Argentina, en cuanto a:

- Proyecciones climáticas por el modelo climático regional PRECIS para 2030-2060
- Impacto biofísico de las olas de calor durante el ciclo de crecimiento de cultivos de verano 2013/2014.

Materiales y Métodos

Datos agrometeorológicos. Se utilizó la base de datos agrometeorológicos diarios (radiación solar, temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación, humedad relativa y viento), de la estación central del Centro Regional de Agrometeorología de la Facultad de Agronomía de Azul-UNCPBA (latitud: 36°45'S; longitud: 59°57'W, altitud: 132 m s. n. m.) (CRAGM 2015), que comprende el período 1988-2015.

Modelos de cultivos. Se utilizaron los modelos de soja y maíz del paquete DSSAT V4.5 (Hoogenboom *et al.* 2012), que permiten la unificación de los formatos de datos de entrada y salida con los modelos de diferentes cultivos. Los datos necesarios son los relacionados con: a) el clima (temperatura máxima y mínima, radiación global, precipitación), que conforma el archivo climático estándar (*.WTH), cargado con datos agrometeorológicos diarios del Centro Regional de Agrometeorología (CRAGM 2015); b) el suelo (propiedades físicas y químicas de cada horizonte del perfil), que conforma el archivo de suelo estándar (*.SOIL), cargado con perfiles de suelos reales (Pazos 2009, Mestelan y Ramaglio 2011); c) el manejo (residuos, fechas de siembra, fertilización, riego), considerado en el archivo (*.X). En los modelos se consideraron fechas de siembra habituales en el centro de la provincia de Buenos Aires: 12 noviembre y 1 de noviembre para soja y maíz, respectivamente. Finalmente, d) los coeficientes genéticos de los cultivares. Todas las variables de estado de los modelos se calcularon diariamente y se visualizaron en las salidas de las simulaciones (*.OUT). Además, el modelo simula los componentes del rendimiento, cuantifica y grafica el crecimiento diario del cultivo hasta el estadio de madurez fisiológica y de cosecha. La subrutina de desarrollo del cultivo utiliza diferentes ecuaciones, así como valores de temperaturas base, óptima y máxima en función del subperíodo fenológico considerado. Esta subrutina genérica funciona para diferentes especies y cultivares. Las características genéticas de un cultivo están consideradas en los parámetros o coeficientes genéticos, contenidos en tres archivos: especie (*.SPE), ecotipo (*.ECO) y cultivar (*.CUL) (Hoogenboom *et al.* 2012).

Ensayos de campo. Antes de utilizar estos modelos, se calibraron para las condiciones locales. Para ello, se

and hybrids of maize intermediate cycle were sown for three consecutive years. These are the genetic materials of both crops that are usually used in the region. Soybean and maize growth under irrigation and dryland farming conditions, without nutritional limitations, in a typical deep Argiudol soil (INTA 1973 and Soil Survey Staff 2014), which is characteristic from the agricultural region. In irrigated crops, the soil was proximal to field capacity, determined by the method of Cassel and Nielsen (1986). Humidity content in the soil was weekly monitored according to the gravimetric method (Gardner 1986). Water, daily applied as complement of precipitation in irrigated crops, was distributed by means of a drip irrigation system and was calculated with the methodology recommended by FAO (Allen *et al.* 1998). Different phenological phases of the crop were determined according to Fehr and Caviness (1977) in soybean, and regarding Ritchie *et al.* (1998) in maize. From 10 to 15 days, the leaf area index (LAI) and dry weight of 0.5 m² of the crop, divided into reproductive and vegetative structures. After harvesting, plants were taken to an oven at 65 °C, until reaching a constant weight. The LAI was measured with a plant canopy analyzer (LAI 2000, LI-COR, inc). The final harvest for determining grain production was performed in two central rows of each plot.

Calibration was performed with data from the first two years of sown, while those from the third were used for validation. There are more details of parameterization in Confalone *et al.* (2016).

Regional climate model. For the analysis of the effect of future climate on crop yields, data obtained from the Atlas Ambiental de Buenos Aires (AABA 2010) were used, following the evolutionary line SRES A2 (Special Report on Emissions Scenarios A2) (Nakicenovic *et al.* 2000), because it is one of the most severe. This stage, from a social point of view, represents a very heterogeneous world, with a global population in continuous growth and regional tendency of economic growth, more fractioned and slower than in other evolutionary lines. The scenario of greenhouse effect gas emissions, called A2, was generated by the Centro de Previsión del Tiempo y Estudios Climáticos (CPTEC) from Brazil, using information of the regional climate model of high resolution PRECIS (Providing Regional Climates for Impact Studies) developed by Hadley Centre (United Kingdom) (AABA 2010). This model considers changes in the concentration of CO₂, mean annual temperature, annual precipitation accumulated by a South American region, including the center of Buenos Aires. Projections for these regions are 614 ppm and 820 ppm of CO₂, 1°C and 2°C of temperature increase for 2030 and 2060, respectively. Regarding precipitations, the model projects an increase of 3 % by 2060, without modifications in 2030. These values were used for modifying the seasonal file of DSSAT, full with daily data of agrometeorological data 1988-2015 (CRAGM 2015).

sembraron durante tres años consecutivos cultivares de soja indeterminada del grupo IV e híbridos de ciclo intermedio de maíz. Estos son los materiales genéticos de ambos cultivos que habitualmente se utilizan en la región. La soja y el maíz crecieron en condiciones de riego y de secano, sin limitantes desde el punto de vista nutricional, en un suelo Argiudol típico profundo (INTA 1973, Soil Survey Staff 2014), característico de la región agrícola del partido. En los cultivos irrigados, el suelo se mantuvo próximo a la capacidad de campo, determinado con el método de Cassel y Nielsen (1986). El contenido de humedad en el suelo se controló semanalmente según el método gravimétrico (Gardner 1986). La lámina de agua, aplicada diariamente como complemento de la precipitación en los cultivos irrigados, se distribuyó por medio de un sistema de riego por goteo y se calculó mediante la metodología recomendada por la FAO (Allen *et al.* 1998). Las distintas fases fenológicas del cultivo se determinaron según Fehr y Caviness (1977), en soja, y la de Ritchie *et al.* (1998), en maíz. De 10-15 d se determinó el índice del área foliar (IAF) y el peso seco de 0.5 m² de cultivo, particionado en estructuras vegetativas y reproductivas. Posteriormente a la cosecha, las plantas se llevaron a estufa a 65 °C, hasta alcanzar peso constante. El IAF se midió con un analizador de dosel (LAI 2000, LI-COR, inc). La cosecha final para determinar la producción de granos se realizó en las dos hileras centrales de cada parcela.

La calibración se realizó con los datos de los dos primeros años de cultivo, mientras que los del tercero se destinaron a la validación. Más detalles de la parametrización en Confalone *et al.* (2016).

Modelo climático regional. Para el análisis del efecto de clima futuro en el rendimiento de los cultivos, se trabajó con los datos obtenidos del Atlas Ambiental de Buenos Aires (AABA 2010), siguiendo la línea evolutiva SRES A2 (Special Report on Emissions Scenarios A2) (Nakicenovic *et al.* 2000) por ser una de las más severas. Este escenario, desde una visión social, representa un mundo muy heterogéneo, con una población mundial en crecimiento continuo y con orientación regional de crecimiento económico, más fragmentado y más lento que en otras líneas evolutivas. El escenario de emisiones de gases de efecto invernadero, denominado A2, lo generó el Centro de Previsión del Tiempo y Estudios Climáticos (CPTEC) de Brasil, a partir de la información del modelo climático regional de alta resolución PRECIS (Providing Regional Climates for Impact Studies) desarrollado por el Hadley Centre (Reino Unido) (AABA 2010). Este modelo considera cambios en la concentración de CO₂, en la temperatura media anual y precipitación anual acumulada para una región de Sudamérica, que incluye el centro de Buenos Aires. Las proyecciones para esta región son: 614 ppm y 820 ppm de CO₂, 1°C y 2°C de aumento de temperatura para 2030 y 2060, respectivamente. Con respecto a las precipitaciones, el modelo proyecta aumento de 3 % para 2060, sin modificaciones en 2030. Estos valores se utilizaron para modificar el archivo estacional

Statistical analysis. Data were processed using the statistical program Statistix (Analytical Software 2003). The presence of the heat wave was determined with a basic statistic of temperature series of the whole period. Mean values, standard deviation and percentile of 90 (P90) and 95 (P95) were calculated. Percentile indicate extreme values, due to their position in the series, organized from lower to higher. Temperature value that determines 95 percentile, indicates that, over this value, there are 5 % of the data of the series, from those in which extreme values are determined, with associated probability value. Heat wave was established when maximum (TMAX) and minimum (TMIN) temperature surpassed the threshold determined by P90 for three consecutive days as minimum. Waves separated by a period of a day were constituents of the same wave, when one of the two variables, TMAX or TMIN, will surpass its threshold in that intermediate day. In this case, wave duration was the total number of days. From the threshold values determined by P95, the frequency series of the most intense heat waves was established, which were included in the previous series (Robinson 2001).

Yield results of soybean and maize crops under conditions of growth, current climate and projections of future climate, were evaluated through analysis of variance (ANOVA). Differences among means were determined according to Duncan (1955).

Results and Discussion

Analyzing yield projections for future decades (table 1), the effect of climate change on crops under irrigation and dryland farming conditions were considered. In this sense, an increase in all situations could be observed. Regarding mean yield in current climate conditions for irrigated soybean, an increase of 23 and 26 % for 2020-29 and 2050-59, respectively, is foreseen. Under dry farming conditions, these percentages are 25 and 28%. In irrigated maize, projections of these increases are 12 and 16 % for 2020-29 and 2050-59, respectively. In maize without irrigation, projections indicate an increase of 19 and 26 % for the two future decades. Foreseen yields are higher for soybean cropping because it is a C_3 species, which photosynthesis rate will increase as a consequence of CO_2 increase.

Other studies have foreseen an increase of yield of different crops in the Pampas region, when using previous versions of DSSAT and MM5-CIMA regional model in the same SRES A1 scenario (Magrín *et al.* 2007 and Murgida *et al.* 2014).

The delay of 15 days for the sowing date shows a yield increase of 3-4 % for future climate in soybean and 23-29 % for maize, growing under irrigation and dry farming conditions. Changes projected by climate regional models will allow to move the cycle of sowing maize towards more favorable thermal conditions, without the risk of frosts. Results found in this study,

del DSSAT, cargado con los datos diarios de la serie de datos agrometeorológicos 1988-2015 (CRAGM 2015).

Análisis estadístico. Los datos se procesaron mediante el programa estadístico Statistix (Analytical Software 2003). La presencia de la ola de calor se realizó por medio de una estadística básica de las series de temperatura de todo el período. Se calcularon los valores medios, desviación estándar y percentiles de 90 (P90) y 95 (P95). Los percentiles indican los valores extremos, por su posición en la serie ordenada de menor a mayor. El valor de temperatura que determina el percentil 95 indica que por encima de dicho valor, se encuentra 5 % de los datos de la serie, a partir de los que se determinan los valores extremos, con valor de probabilidad asociada. La ola de calor se estableció cuando la temperatura máxima (TMAX) y mínima (TMIN) superaron los umbrales determinados por el P90 durante tres días consecutivos como mínimo. Las olas separadas por intervalo de un día fueron constituyentes de la misma ola, cuando una de las dos variables, TMAX o TMIN, superara su umbral en ese día intermedio. En este caso, la duración de la ola fue el número total de días. A partir de los valores umbrales determinados por el P95, se estableció la serie de frecuencias de las olas de calor más intensas, que estaban incluidas en la serie anterior (Robinson 2001).

Los resultados del rendimiento de los cultivos de soja y maíz en condiciones de crecimiento, clima actual y proyecciones de clima futuro, se evaluaron mediante análisis de varianza (ANOVA). Las diferencias entre medias se determinaron según Duncan (1955).

Resultados y Discusión

Al analizar las proyecciones del rendimiento para décadas futuras (tabla 1), se consideró el efecto del cambio climático en los cultivos en condiciones de riego y secano. En este sentido, se pudo observar aumento en todas las situaciones. Con respecto al rendimiento promedio en las condiciones climáticas actuales para soja irrigada, se prevé aumento de 23 y 26 % para 2020-29 y 2050-59, respectivamente. En condiciones de secano, estos porcentajes pasan a ser de 25 y 28 %. En maíz irrigado, las proyecciones de esos aumentos son de 12 y 16 % para las décadas 2020-29 y 2050-59, respectivamente. En maíz sin riego, las proyecciones indican aumento de 19 y 26 % para las dos décadas futuras. Los rendimientos previstos son mayores en el cultivo de soja, debido a que se trata de una especie C_3 , cuya tasa de fotosíntesis se verá incrementada como consecuencia del aumento de CO_2 .

Otros trabajos han previsto aumento en el rendimiento de diversos cultivos en la región pampeana, al utilizar versiones anteriores del DSSAT y el modelo regional MM5-CIMA en el mismo escenario SRES A1 (Magrín *et al.* 2007 y Murgida *et al.* 2014).

El atraso de 15 días en la fecha de siembra muestra aumento en el rendimiento de 3-4 % para el clima futuro en soja y 23-29 % para maíz, creciendo en condiciones de riego y secano. Los cambios proyectados por los modelos regionales climáticos permitirían desplazar el ciclo del

Table 1. Mean yield (Kg ha⁻¹) of soybean and maize, growing under current climate and with projections for future decades

| | Current climate | 2020-2029 | 2050-2059 | SE (±) | Significance |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------|--------------|
| Soybean | | | | | |
| With irrigation | 5418 ^c | 7007 ^b | 7307 ^a | 43.00 | p= 0.0001 |
| Without irrigation | 3414 ^c | 4572 ^b | 4710 ^a | 61.76 | p= 0.0001 |
| Maize | | | | | |
| With irrigation | 16630 ^c | 18423 ^b | 19824 ^a | 35.11 | p= 0.0001 |
| Without irrigation | 9083 ^c | 11169 ^b | 12343 ^a | 58.92 | p= 0.0001 |

^{abc} Means in the line of the table, followed by the same letter do not differ at P < 0.05 (Duncan 1955)

besides the variation of foreseen increase values, agree with the general projections for all the pampas region (Magrín *et al.* 2007). Summer crops would be less affected by future climate scenarios. This type of study, performed with climate models, do not take into account the effect that could have pest and diseases on crops or the effects of new climate conditions. In addition, estimation of potential effect of climate change includes reliability of climate scenarios, defined with projections performed for 10 years, which prevents the evaluation of aspects of great importance for agricultural activity, like variability within the year.

After analyzing heat waves registered in Azul, thresholds indicated by percentile 90 for all the series, which include 1760 cases, were 33.1 °C and 18.0 °C for TMAX and TMIN, respectively. This showed 9 situations of heat waves between January 1988 and 2015. Those generated in 2013 and 2014 have been intense (P>95: TMAX = 34.4 °C; TMIN= 19.0 °C). Duration and mean values of temperature are shown in table 2.

The heat wave of the highest duration (9 d) appeared in December 2013. A second wave was verified in January that, although with short duration (4 days), was the one with the highest maximum temperature of all the records. Both waves took part of the cropping cycle 2013/14 for maize and soybean. These high temperatures, together with water stress, have a

cultivo de maíz hacia condiciones térmicas más favorables, sin correr riesgos de heladas. Los resultados hallados en este trabajo, si bien varían en los valores de aumento previstos, concuerdan con las proyecciones generales emitidas para toda la región pampeana (Magrín *et al.* 2007): los cultivos de verano serían poco afectados por los escenarios climáticos futuros. En este tipo de estudio, realizado con modelos climáticos, no se tiene en cuenta el efecto que pudieran tener las plagas y enfermedades en el cultivo ni los efectos de las nuevas condiciones climáticas. Además, la estimación del efecto potencial del cambio incluye la confiabilidad de los escenarios climáticos, definidos con proyecciones realizadas para 10 años, que impide evaluar aspectos de gran importancia para la actividad agrícola, como lo es la variabilidad interanual.

Al realizar un análisis de las olas de calor registradas en Azul, los umbrales indicados por el percentil 90 para toda la serie, que incluye 1760 casos, fueron de 33.1 °C y 18.0 °C para las TMAX y TMIN, respectivamente. Esto arrojó 9 eventos de olas de calor en total, entre enero de 1988 y 2015. Entre las que se generan en 2013 y 2014 han sido intensas (P>95: TMAX = 34.4 °C; TMIN= 19.0 °C). La duración y valores promedio de temperatura se pueden observar en la tabla 2.

Se puede observar que la ola de calor de mayor duración (9 d) es la que se presentó en diciembre de 2013. Se verificó una segunda ola en enero que, aunque de corta duración (4 días), resultó ser la de mayor temperatura máxima de

Table 2. Occurrence of "heat wave" in the period from 1988 to 2015 in Azul. Dates in bold letter are heat waves present in the analysis of crop cycle from 2013 to 2014 for soybean and maize

| Year | Date | N° days | Tmax | Tmin |
|-------------|------------------|----------|-------------------|-------------------|
| 1989 | 1-7 Jan | 7 | 35.3 ± 3.0 | 18.1 ± 2.0 |
| 1997 | 23-28 Jan | 6 | 33.0 ± 1.2 | 18.7 ± 1.1 |
| 2003 | 13-17 Jan | 5 | 33.7 ± 3.1 | 19.3 ± 1.3 |
| 2004 | 27-29 Jan | 3 | 34.2 ± 1.9 | 19.8 ± 0.7 |
| 2005 | 31 dic-3 Jan | 4 | 33.6 ± 1.1 | 18.8 ± 0.8 |
| 2010 | 26-29 Jan | 4 | 34.7 ± 0.8 | 18.5 ± 0.4 |
| 2013 | 22-30 Dec | 9 | 34.6 ± 1.8 | 19.0 ± 2.5 |
| 2014 | 15-18 Jan | 4 | 37.8 ± 1.9 | 19.1 ± 2.3 |
| 2015 | 26-29 Dec | 4 | 34.2 ± 1.4 | 19.3 ± 1.3 |

remarkable and different biophysical effect on the physiology of both crops. In soybean sowing in crop date of November 11, the heat wave of December affected the crop from 40 to 48 d after sowing (DAS). Extreme heat wave in January, 2014, occurred between the 64 and 67 DAS. In maize, with a sowing date of November 1st, these events appeared between 51 and 59 DAS (December heat wave) and between 75 and 78 DAS (January heat wave).

Figure 1 shows the index (ETR/ETo), which indicates the relationship between real evapotranspiration of non-irrigated crop (ETR) and the evapotranspiration of reference (ETo), calculated by the method of Penman-Monteith (Allen *et al.* 1998), during the year with heat wave in maize (left) and soybean (right). In the inferior part, there is the evolution of the leaf area index (LAI) and total dry matter (DM) of irrigated crops and under dry farming conditions during the cropping cycle 2013-14.

Maize flowered on January 4th (64 DAS) and reaches maturity on March 12th (131 DAS). The maximum LAI decreases in 20 % for the crop that grows under dry farming conditions. Total dry matter is reduced in 55 %, which is interpreted as a drastic decrease of grain yield of 64.5 %. In January, there is a critical phase in maize, with maximum temperatures of 38 °C and high water deficit, with evapotranspiration of the crop, which only covers 6 % of atmospheric demand. In an analysis of the heat wave from 2012, which affected maize production in United States, Chung *et al.* (2014), after using a geospatial analysis and DSSAT models, concluded that the decrease of the yield of Corn Belt could vary between 29 % and 57 % during these extreme events.

In soybean sowing, flowering was produced on January 5th (54 DAS), while the phenological phase of pod formation takes place on January 30th (79 DAS) and seed formation on February 17th (97 DAS). Growth parameters show less extreme values than maize because all soybean cultivars, sown in the region, have an undetermined growth (continue to produce leaves after flowering), which allow certain "escape" to stress conditions. Anyway, the crop that grows without irrigation shows LAI 18 % lower than that with irrigation, and 26.5 % less total dry matter. This means a reduction of 29 % of grain yield. At the end of the extreme heat wave, ETR/ETo values reached a relation of 0.26.

Hoover *et al.* (2016) conducted controlled experiments of heat waves with C₄ grasses and observed that the main effect on photosynthesis is provoked by water deficit. Modifying the effect of heat and maintaining the crop only with irrigation, it was possible to detect the effect of temperature on photosynthesis.

In order to isolate the temperature effect, figure 2 shows a contrast in the increase of dry matter of grains

todo el registro. Ambas olas formaron parte del ciclo de cultivo 2013/14 para maíz y soja. Estas altas temperaturas, sumadas al estrés hídrico ejercen un efecto biofísico notable y diferencial en la fisiología de los dos cultivos. En el cultivo de soja para la fecha de siembra del 11 de noviembre, el evento de ola de calor de diciembre afecta al cultivo, desde los 40 a los 48 d después de la siembra (DDS). La ola de calor extrema, enero de 2014, ocurre durante los 64 a 67 DDS. En el maíz, con fecha de siembra del 1 de noviembre, estos eventos corren en los 51 a 59 DDS (ola de calor diciembre) y 75 a 78 DDS (ola de calor de enero).

En la figura 1 se puede observar el índice (ETR/ETo), que indica la relación entre la evapotranspiración real del cultivo (ETR) no irrigado y la evapotranspiración de referencia (ETo), calculada por el método de FAO Penman-Monteith (Allen *et al.* 1998), durante el año con ola de calor en maíz (izquierda) y soja (derecha). En la parte inferior se grafica la evolución del índice de área foliar (IAF) y la materia seca total (MS) de los cultivos irrigados y en condiciones de secano durante el ciclo de cultivo 2013-14.

El maíz llega a floración el día 4 de enero (64 DDS) y alcanza la madurez el 12 de marzo (131 DDS). El IAF máximo tiene una caída de 20 % para el cultivo, que crece en condiciones de secano. La materia seca total se reduce 55 %, parámetros que se traducen en una disminución drástica del rendimiento en granos de 64.5 %. En enero ocurre la fase crítica en maíz, con temperaturas máximas de 38 °C y gran déficit hídrico, con evapotranspiración del cultivo, que solo cubre 6 % de la demanda atmosférica. En un análisis de la ola de calor del 2012, que afectó la producción de maíz de EE. UU, Chung *et al.* (2014), al utilizar un análisis geoespacial y los modelos del DSSAT, concluyeron que la disminución del rendimiento del cinturón de maíz podría variar entre 29 % y 57 % durante estos eventos extremos.

En el cultivo de soja, la floración se produce el 5 de enero (54 DDS), mientras la fase fenológica de formación de vainas tiene lugar el 30 de enero (79 DDS) y la formación de semillas el 17 de febrero (97 DDS). Los parámetros de crecimiento presentan valores menos extremos que en el maíz, ya que los cultivares de soja sembrados en la región son todos de crecimiento indeterminado (siguen produciendo hojas después de la floración), lo que permite cierto "escape" de las condiciones de estrés. De cualquier forma, el cultivo que crece sin riego presenta IAF 18 % más bajo que el regado, y 26.5 % menos de materia seca total. Esto se traduce en reducción de 29 % del rendimiento en grano. Al finalizar la ola de calor extrema, los valores ETR/ETo alcanzan relación de 0.26.

Hoover *et al.* (2016) realizaron experimentos controlados de olas de calor con gramínea C₄ y observaron que el principal efecto en la fotosíntesis lo provoca el déficit hídrico. Al enmascarar el efecto del calor y mantener solo el cultivo con riego, fue posible detectar el efecto de la temperatura en la fotosíntesis.

Para intentar aislar el efecto de la temperatura, en la figura 2 se contrasta el aumento en la materia seca de

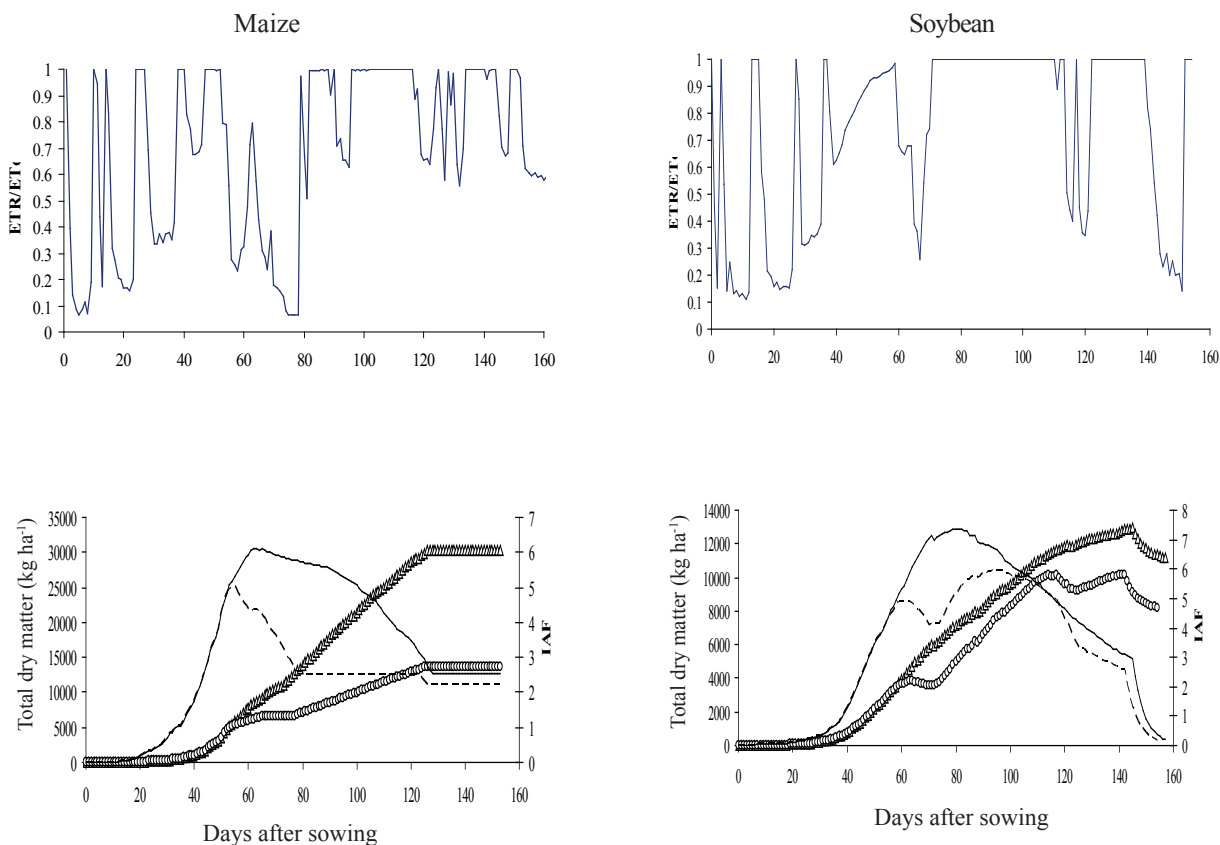


Figure 1. Evolution of leaf area index (LAI) and total Dry Matter (DM) of crops under irrigation and dry conditions during the cropping cycle 2013-14. The superior part shows the relationship (ETR/ET_o) during the heat wave of non-irrigated crops: maize (left) and soybean (right)

in irrigated crops in a “typical” year in this region, as well as the growth year 2000/2001 versus the year with heat wave 2013/2014. In sowing maize, during 2000-01, yield was 15672 kg ha^{-1} and the crop reaches its flowering on January 12th (72 DAS), while in 2013-2014, this phenological phase was reached at 64 DAS. In 2013-14, yield was 22 % higher despite the shortening of a week in the flowering date regarding 2000-01. It means that when considering the increase of temperature in absence of water stress, for the characteristics of heat waves within the cropping cycle 2013-14, regarding duration and reached temperatures (table 1), the effect was beneficial for maize. This is a result of the reproductive growth temperatures in Azul, which are normally in a suboptimal range for C_4 species and because there were two extreme events, separated by 16 d of normal temperatures. The last heat wave occurred between 75 and 78 DAS in maize, and practically do not reach the full period of grain filling that lasts between 76 and 127 DAS. Regarding the phenological phase, Rattalino-Edreira and Otegui (2013) determined that heat waves during the first half of effective grain filling reduce availability of grain assimilates, which determines interruptions in the filling.

In sowing irrigated soybean, in 2000-01, duration of grain filling lasted more days due to lower temperatures. Final grain yield was 5590 kg ha^{-1} , while in 2013-14,

granos en cultivos irrigados de un año “típico” en nuestra región, como fue el año de crecimiento 2000/2001 versus el año con ola de calor 2013/2014. En el cultivo de maíz, en el año 2000-01, el rendimiento fue de 15672 kg ha^{-1} y el cultivo llega a floración el 12 de enero (72 DDS), mientras que en 2013-14 esta fase fenológica se alcanza a los 64 DDS. En el año 2013-14, el rendimiento fue de 22 %, más alto a pesar del acortamiento de una semana en la fecha de floración con respecto al año 2000-01. Es decir, que cuando se considera el aumento de la temperatura en ausencia de estrés hídrico, para las características de las olas de calor presentes en el ciclo de cultivo 2013-14, en cuanto a duración y temperaturas alcanzadas (tabla1), el efecto fue beneficioso para el maíz. Esto se debe a que en Azul las temperaturas de crecimiento reproductivo se encuentran, normalmente, en un rango subóptimo para una especie C_4 y a que se trató de dos eventos extremos separados por 16 d de temperaturas normales. La última ola de calor ocurre entre 75 y 78 DDS en el maíz, y prácticamente no alcanza a afectar en el período pleno de llenado de granos que se extiende entre los 76 y 127 DDS. Con respecto a esta fase fenológica, Rattalino-Edreira y Otegui (2013) determinaron que las olas de calor durante la primera mitad del llenado efectivo de granos reducen la disponibilidad de asimilados por grano, lo que determina interrupciones en el llenado.

En el cultivo de soja irrigado, en el 2000-01, la duración del llenado de granos se extendió por un número mayor de días, debido a las temperaturas más bajas. El

it was 4845 kg ha⁻¹. Temperature increase for the same concentration of CO₂ was not beneficial for a C₃ species, which is demonstrated in this decrease of 13 % in the yield.

These data coincide with publications of other

rendimiento en granos final fue de 5590 kg ha⁻¹, mientras que en 2013-14 fue de 4845 kg ha⁻¹. El aumento de temperatura para una misma concentración de CO₂ no fue beneficioso para una especie C₃, lo que se demuestra en esta disminución de 13 % en el rendimiento.

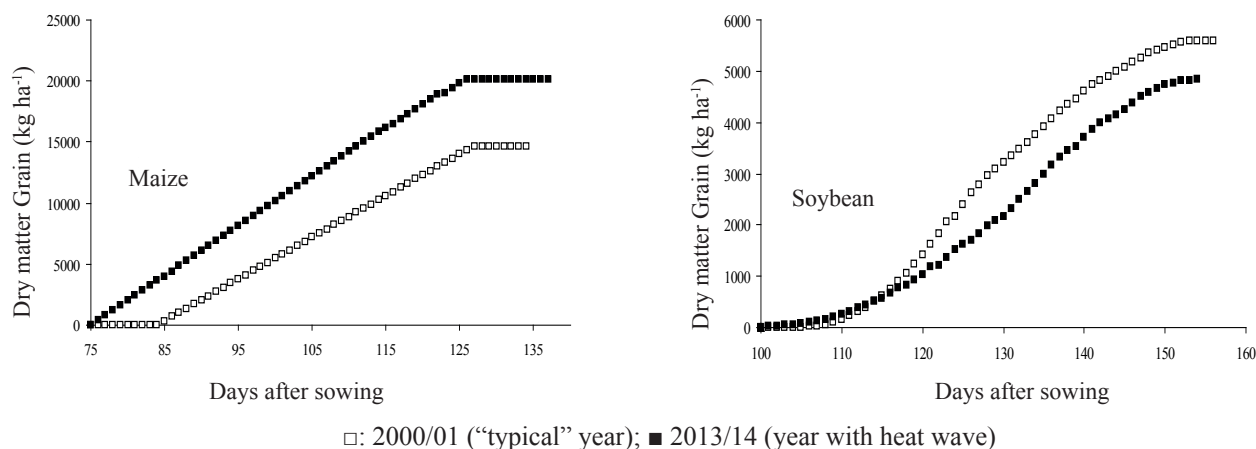


Figure 2. Grain filling in maize (left) and soybean (right) during the year of heat wave and in a year with normal temperatures

authors, who state that water availability in December-January, near the flowering date of maize, is very related to yields and response to fertilizer addition, while water stress affects synchrony between pollen production and stigmas, as well as the establishment of grains in pollinized ears (Hall *et al.* 1982 and Sadras *et al.* 1985).

Though undetermined soybean has a higher possibility of escaping from water deficit, high temperature reduces reproductive partition, which, at the same time, decreases yield (Molino 2001), when the fertilizing effect of CO₂ is not taken into account.

As stated by Hoover *et al.* (2016), in the historical climate, water deficit and heat waves usually occur together with climate change. Probability of new and different imbalances among these climate extreme events may increase, with high direct effects of heat waves on crop yield.

These results show that, besides working on projections of regional models, it is important to quantify extreme events for considering the effect of climate change in agroecosystems of a region.

Conclusions

For Azul, center of Buenos Aires province, climate projections indicate that there will be increases of potential yields towards the end of 21st century. These will be higher in soybean than in maize due to the effect provoked by the increase of CO₂. However, when considering variability imposed by heat waves, it is evident that soybean and maize will experience a great yield reduction during those events when they are sown under dry rarming conditions, typical way of sowing soybean and maize in the pampas

Estos datos coinciden con lo publicado por otros autores, quienes expresan que la disponibilidad de agua durante los meses de diciembre-enero, aproximados a la fecha de floración del cultivo de maíz, está muy relacionada con los rendimientos y la respuesta al agregado de fertilizante, mientras que el estrés hídrico afecta la sincronía entre la producción de polen y estigmas, así como la fijación de los granos en las espigas polinizadas (Hall *et al.* 1982, y Sadras *et al.* 1985).

Si bien la soja indeterminada tiene mayor posibilidad de escape ante presencia de déficit hídrico, la alta temperatura reduce la partición reproductiva, lo que a su vez disminuye el rendimiento (Molino 2001), cuando no se tiene en cuenta el efecto fertilizante del CO₂.

Como expresan Hoover *et al.* (2016), en el clima histórico, el déficit hídrico y las olas de calor a menudo co-ocurren con el cambio climático. La probabilidad de nuevos y no análogos desajustes entre estos extremos climáticos puede aumentar, con grandes efectos directos de las olas de calor en el rendimiento de los cultivos.

Estos resultados muestran que, además de trabajar con las proyecciones de los modelos regionales, es importante cuantificar los eventos extremos para considerar el efecto del cambio climático en los agroecosistemas de una región.

Conclusiones

Para Azul, centro de la provincia de Buenos Aires, las proyecciones climáticas indican que se presentarán incrementos en los rendimientos potenciales hacia finales del siglo XXI. Estos serán de mayor magnitud en soja con respecto al maíz por el efecto que provoca el aumento del CO₂. Sin embargo, cuando se considera la variabilidad impuesta por las olas de calor se evidencia que la soja y

region. Under conditions of lack of water stress, the effect of temperature increase, produced by two heat waves during growth cycle of summer crops 2013-14, was beneficial for maize and harmful for soybean. Although these are preliminary studies, the importance of using agrometeorological data is evident, as well as the need of conducting more researches on the effects of extreme phenomena in different phenological phases of crops for maintaining sustainability of agroecosystems from the center of Buenos Aires province, in order to preserve food safety.

Cuban Journal of Agricultural Science, Volume 51, Number 2, 2017.

el maíz experimentarán durante estos eventos una fuerte reducción en el rendimiento, cuando se cultivan en condiciones de secano, forma típica de cultivo de la soja y maíz en la región pampeana. En condiciones de falta de estrés hídrico, el efecto de aumento de temperatura, producido por dos olas de calor durante el ciclo de crecimiento de cultivos de verano 2013-14, resultó beneficioso para el maíz y perjudicial para soja. Si bien se trata de estudios preliminares, se evidencia la importancia que tiene la utilización de datos agrometeorológicos diarios en este tipo de estudio, así como la necesidad de contar con más investigaciones acerca de los efectos de fenómenos extremos en diferentes fases fenológicas de los cultivos para mantener la sustentabilidad de los agroecosistemas del centro de la provincia de Buenos Aires, a fin de preservar la seguridad alimentaria.

References

- AABA (Atlas Ambiental de Buenos Aires). 2010. Atlas Ambiental de Buenos Aires. Available: <<http://www.atlasdebuenosaires.gov.ar/aaba/>>, [Consulted: July 5, 2017].
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. & Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. (ser. Irrigation and drainage, no. ser. 56), Rome: FAO, ISBN: 92-5-104219-5, Available: <<http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm>>, [Consulted: May 30, 2017].
- Alves, L. M. & Marengo, J. 2010. "Assessment of regional seasonal predictability using the PRECIS regional climate modeling system over South America". *Theoretical and Applied Climatology*, 100(3-4): 337-350, ISSN: 0177-798X, 1434-4483, DOI: 10.1007/s00704-009-0165-2.
- Analytical Software 2003. Statistix 8: User's Manual. Alton, IL, U.S.A.: Analytical Software, 396 p., ISBN: 978-1-881789-06-2, Available: <https://books.google.com/cu/books?id=-x_mAAAACAAJ>, [Consulted: July 5, 2017].
- Cabré, M. F., Solman, S. A. & Nuñez, M. N. 2010. "Creating regional climate change scenarios over southern South America for the 2020's and 2050's using the pattern scaling technique: validity and limitations". *Climatic Change*, 98(3-4): 449-469, ISSN: 0165-0009, 1573-1480, DOI: 10.1007/s10584-009-9737-5.
- Cassel, D. K. & Nielsen, D. R. 1986. "Field Capacity and Available Water Capacity". In: *Methods of soil analysis*, (ser. SSSA Book Series), Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, ISBN: 978-0-89118-864-3, DOI: 10.2136/sssabookser5.1.2ed.c36, Available: <<https://dl.sciencesocieties.org/publications/books/abstracts/sssabookseries/methodsofsoilan1/901>>, [Consulted: July 5, 2017].
- Chung, U., Gbegbelegbe, S., Shiferaw, B., Robertson, R., Yun, J. I., Tesfaye, K., Hoogenboom, G. & Sonder, K. 2014. "Modeling the effect of a heat wave on maize production in the USA and its implications on food security in the developing world". *Weather and Climate Extremes*, 5: 67-77, ISSN: 2212-0947, DOI: 10.1016/j.wace.2014.07.002.
- Confalone, A., Vilatte, C., Lázaro, L., Roca, N., Mestelan, S., Aguas, L., Navarro, M. & Sau, F. 2016. "Parametrización del modelo CROPGRO-soybean y su uso como herramienta para evaluar el impacto del cambio climático sobre el cultivo de soja". *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*, 48(1): 49-64, ISSN: 1853-8665.
- CRAGM (Centro Regional de Agrometeorología). 2015. Centro Regional de Agrometeorología de la Facultad de Agronomía de Azul. Available: <<http://www1.faa.unicen.edu.ar/centro/centroreg.php>>, [Consulted: July 5, 2017].
- Duncan, D. B. 1955. "Multiple Range and Multiple F Tests". *Biometrics*, 11(1): 1-42, ISSN: 0006-341X, DOI: 10.2307/3001478.
- Fehr, W. R. & Caviness, C. 1977. Stages of soybean development. (ser. Special Report, no. ser. 87), Ames, IA: Iowa State University, 12 p., Available: <<http://lib.dr.iastate.edu/specialreports/87>>, [Consulted: July 5, 2017].
- Gardner, W. 1986. "Water content". In: *Methods of soil analysis*, (ser. SSSA Book Series), Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, pp. 493-594, ISBN: 978-0-89118-864-3, DOI: 10.2136/sssabookser5.1.2ed.c36, Available: <<https://dl.sciencesocieties.org/publications/books/abstracts/sssabookseries/methodsofsoilan1/901>>, [Consulted: July 5, 2017].
- Hall, A. J., Vilella, F., Trapani, N. & Chimenti, C. 1982. "The effects of water stress and genotype on the dynamics of pollen-shedding and silking in maize". *Field Crops Research*, 5: 349-363, ISSN: 0378-4290, DOI: 10.1016/0378-4290(82)90036-3.
- Hoogenboom, G., Jones, J. W., Wilkens, P. W., Porter, C. H., Boote, K. J., Hunt, L. A., Singh, U., Lizaso, J. I., White, J. W., Uryasev, O., Ogoshi, R., Koo, J., Shelia, V. & Tsuji, G. Y. 2012. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT). version 4.5, Prosser, Washington: DSSAT Foundation, Available: <<http://dssat.net>>.
- Hoover, D. L., Knapp, A. K. & Smith, M. 2016. "Photosynthetic responses of a dominant C₄ grass to an experimental heat wave are mediated by soil moisture." *Oecologia*, 183(1): 303-313, ISSN: 0029-8549, DOI: 10.1007/s00442-016-3755-6.
- INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) 1973. Cuadernillo de la carta de suelos de la República Argentina. Buenos Aires, Argentina: INTA, Hoja 3760-16.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2014. Climate change 2014. Geneva: IPCC, 116 p.
- Köppen, W. P. 1931. Grundriss der Klimakunde. Berlin: Walter de Gruyter Co., 388 p.

- MacCarthy, J. J. 2001. Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the third assessment. (ser. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change), Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1032 p., ISBN: 978-0-521-01500-4.
- Magrín, G., Gay-García, C., Cruz-Choque, D., Giménez, J., Moreno, A., Nagy, G., Nobre, C. & Villamizar, A. 2007. Latin America. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., van der Linden, P. J. & Hanson, C. E. (eds.), UK: Cambridge University Press, 581-615 p., ISBN: 978-0-521-70597-4.
- Marengo, J. A., Jones, R., Alves, L. M. & Valverde, M. C. 2009. "Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system". *International Journal of Climatology*, 29(15): 2241–2255, ISSN: 1097-0088, DOI: 10.1002/joc.1863.
- Meehl, G. A. & Tebaldi, C. 2004. "More Intense, More Frequent, and Longer Lasting Heat Waves in the 21st Century". *Science*, 305(5686): 994–997, ISSN: 0036-8075, 1095-9203, DOI: 10.1126/science.1098704.
- Mestelan, S. & Ramaglio, J. C. 2011. "Características, distribución y usos de los suelos del partido de Azul". In: Requesens, E. C., Bases agroambientales para un desarrollo sustentable del partido de Azul, 1st ed., Buenos Aires, Argentina: Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, pp. 61–75, ISBN: 978-950-658-269-2, Available: <ftp://www1.faa.unicen.edu.ar/pub/Bases_Agroambientales.pdf>, [Consulted: July 5, 2017].
- Molino, J. 2001. Estrés térmico por alta temperatura en soja (*Glycine max* (L.) Merr.): análisis de la dinámica de producción y fijación de vainas y su efecto sobre la determinación del rendimiento. M.Sc. Thesis, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina, 66 p.
- Murgida, A. M., Travasso, M. I., González, S. & Rodríguez, G. R. 2014. Evaluación de impactos del cambio climático sobre la producción agrícola en la Argentina. (ser. Medio Ambiente y Desarrollo, no. ser. 155), Santiago de Chile: Naciones Unidas, 70 p., Available: <http://repositorio.cepal.org/handle/11362/37197>, [Consulted: July 5, 2017].
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., De Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A. & Yong, J. 2000. Special report on emissions scenarios: a special report of working group III of the Intergovernmental panel on climate change. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 599 p., ISBN: 978-0-521-80081-5.
- Navarro, M., Confalone, A., Vilatte, C. & Aguas, L. 2011. "Características agroclimáticas para la sustentabilidad agropecuaria en el partido de azul". In: Requesens, E. C., Bases agroambientales para un desarrollo sustentable del partido de Azul, 1st ed., Buenos Aires, Argentina: Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, pp. 29–59, ISBN: 978-950-658-269-2, Available: <ftp://www1.faa.unicen.edu.ar/pub/Bases_Agroambientales.pdf>, [Consulted: July 5, 2017].
- Pazos, M. S. 2009. "Los Phaeozem pampeanos en la WRB. 2006". *Geociencias. Asociación de ciencias geológicas y del medio natural*, 16: 19–22, ISSN: 1699-9053.
- Rattalino-Edreira, J. I. & Otegui, M. E. 2013. "Heat stress in temperate and tropical maize hybrids: A novel approach for assessing sources of kernel loss in field conditions". *Field Crops Research*, 142: 58–67, ISSN: 0378-4290, DOI: 10.1016/j.fcr.2012.11.009.
- Ritchie, J. T., Singh, U., Godwin, D. C. & Bowen, W. T. 1998. "Cereal growth, development and yield". In: Understanding Options for Agricultural Production, (ser. Systems Approaches for Sustainable Agricultural Development), Springer, Dordrecht, pp. 79–98, ISBN: 978-90-481-4940-7, DOI: 10.1007/978-94-017-3624-4_5, Available: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-017-3624-4_5>, [Consulted: July 5, 2017].
- Robinson, P. J. 2001. "On the Definition of a Heat Wave". *Journal of Applied Meteorology*, 40(4): 762–775, ISSN: 0894-8763, DOI: 10.1175/1520-0450(2001)040<0762:OTDOAH>2.0.CO;2.
- Rosenzweig, C., Jones, J. W., Hatfield, J. L., Ruane, A. C., Boote, K. J., Thorburn, P., Antle, J. M., Nelson, G. C., Porter, C., Janssen, S., Asseng, S., Basso, B., Ewert, F., Wallach, D., Baigorría, G. & Winter, J. M. 2013. "The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP): Protocols and pilot studies". *Agricultural and Forest Meteorology*, 170: 166–182, ISSN: 0168-1923, DOI: 10.1016/j.agrformet.2012.09.011.
- Sadras, V., Hall, A. & Schlichter, T. 1985. "Kernel set in the uppermost ear in maize. II. A simulation model of the effects of water stress". *Maydica*, 30: 49–66, ISSN: 2279-8013.
- SIIA (Sistema Integrado de Información Agropecuaria). 2015. Programa de Servicios Agrícolas Provinciales, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Available: <https://datos.magyp.gob.ar/>, [Consulted: July 7, 2017].
- Soil Survey Staff 2014. Keys to Soil Taxonomy. 12th ed., Washington, DC.: USDA - Natural Resources Conservation Service, 360 p., Available: <https://www.nrcs.usda.gov/wps/PA_NRCSCconsumption/download?cid=stelprdb1252094&ext=pdf>, [Consulted: July 5, 2017].
- Travasso, M. I., Magrín, G. O., Rodríguez, G. R., Solman, S. & Nunez, M. 2009. "Climate change impacts on regional maize yields and possible adaptation measures in Argentina". *International Journal of Global Warming*, 1: 201–213, ISSN: 1758-2083, 1758-2091, DOI: 10.1504/IJGW.2009.027089.